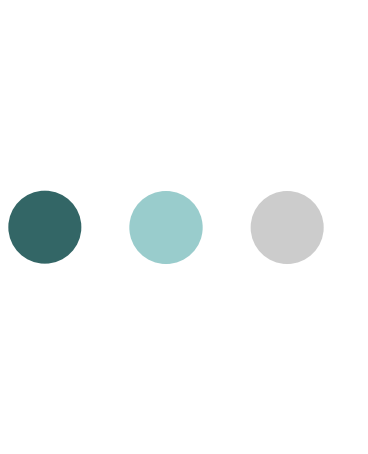


# Multimedijalno inženjerstvo – master strokovne studije



## Digitalni komunikacioni sistemi: **Lekcija 3: Paketska komutacija**

zima 2019/2020

Branimir M. Trenkić

# Paketska komutacija

## *Kako prevazići ne-efikasnost komutacije kola?*

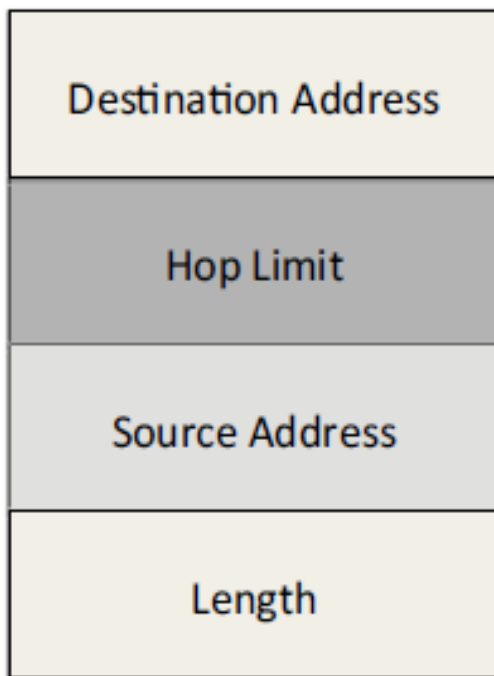
- Dozvoliti predajnicima da šalju podatke u svakom trenutku (*dodela resursa* tek na zahtev)
- Da i dalje bude *omogućeno deljenje linka*
- **Paketska komutacija** je način prenosa koja to dozvoljava
- Koristi vrlo jednostavnu ideju:- *svakom okviru* podataka se dodaje jedna *manja količina informacija* na bazi koje komutatori vrše upućivanje tog okvira

# Paketska komutacija

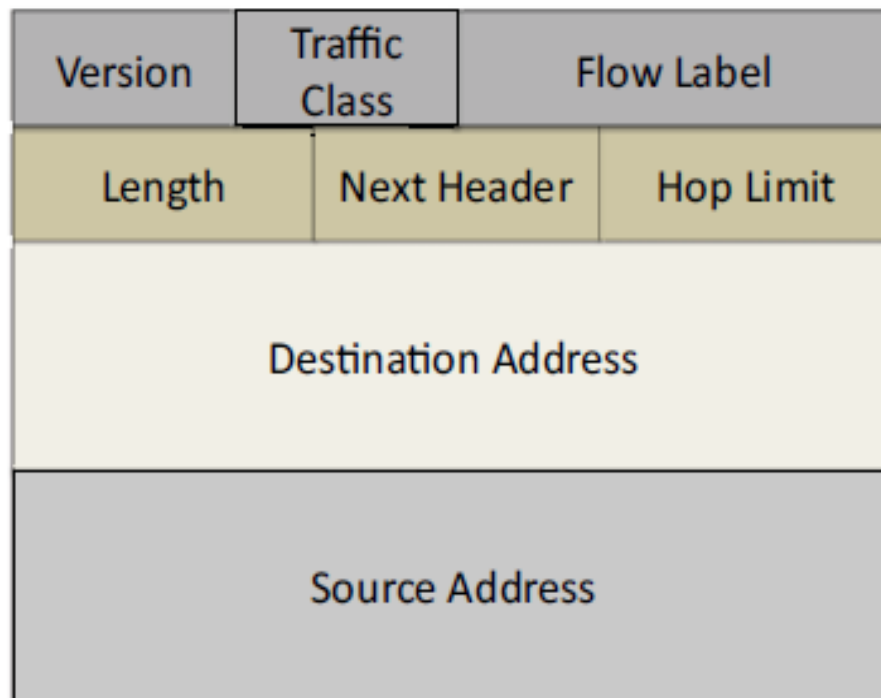
- ***Predhode*** korisničkim podacima i
- Smeštaju se u posebnom delu okvira koji se naziva – ***zaglavlje***
- Tako formatiran okvir se naziva – ***paket***
- Najčešće zaglavlje svakog paketa ***sadrži adresu odredišta*** - komutatori koriste ovu informaciju radi ***prosleđivanja paketa***
- Zaglavlje često ***sadrži i adresu izvorišta*** - kako bi se omogućilo prijemniku paketa da jednostavno ***vрати poruku nazad*** do predajnika

# Paketska komutacija

Primer zaglavlja paketa:



Zaglavlje paketa koje se koristi u IPv6:





# Paketska komutacija – uloga komutatora

- ***Koristi odredišnu adresu*** kao ***ključ u pretraživanju*** strukture podataka koja se naziva – **ruting tabela**
- ***Rezultat pretraživanja*** je ***identifikator odlaznog linka*** po kome paket treba uputiti kako bi se on preneo do željene destinacije
- Postoji ***više načina implementacije operacije pretraživanja*** ruting tabele
  - Najjednostavniji način podrazumeva takvu ruting tabelu koja direktno preslikava adresu destinacije u jedan od linkova (portova) na komutatoru



# Paketska komutacija – uloga komutatora

Dakle,

- **Prosleđivanje** je relativno **jednostavno** - pretraživanjem strukture podataka
- **Problem je u formiranju ruting tabele**
- Ideja: Koristi se **ruting protokol** koji uređuje sve aspekte **distribuiranog procesa** koji se (I) odvija **u pozadini**; (II) **implementira na komutatorima**
- **Komutatori** u mrežama sa paketskom komutacijom koji implementiraju ove funkcije se nazivaju još i **ruteri**

# Statističko multipleksiranje

- Statistički (asinhroni) multiplekser **dinamički dodeljuje vremenske slotove** – samo ako se zahteva prenos
- Ima veći broj **ulazno/izlaznih (multipleksiranih) linija** velikih brzina
- Svaka **linija poseduje** svoj **bafer**
- **Na strani ulaza** zadatak multipleksera je **da iz bafera očitava prispele okvire**
- Pre prosleđivanja, na strani izlaza **formira se ram podataka** (jedan ciklus) u izlaznom memorijskom prostoru

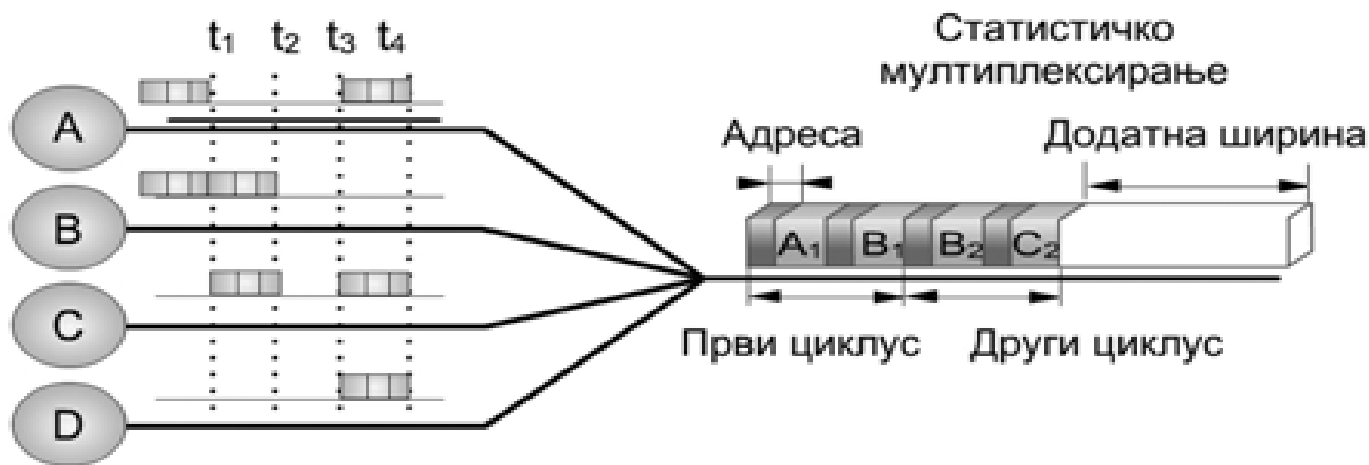
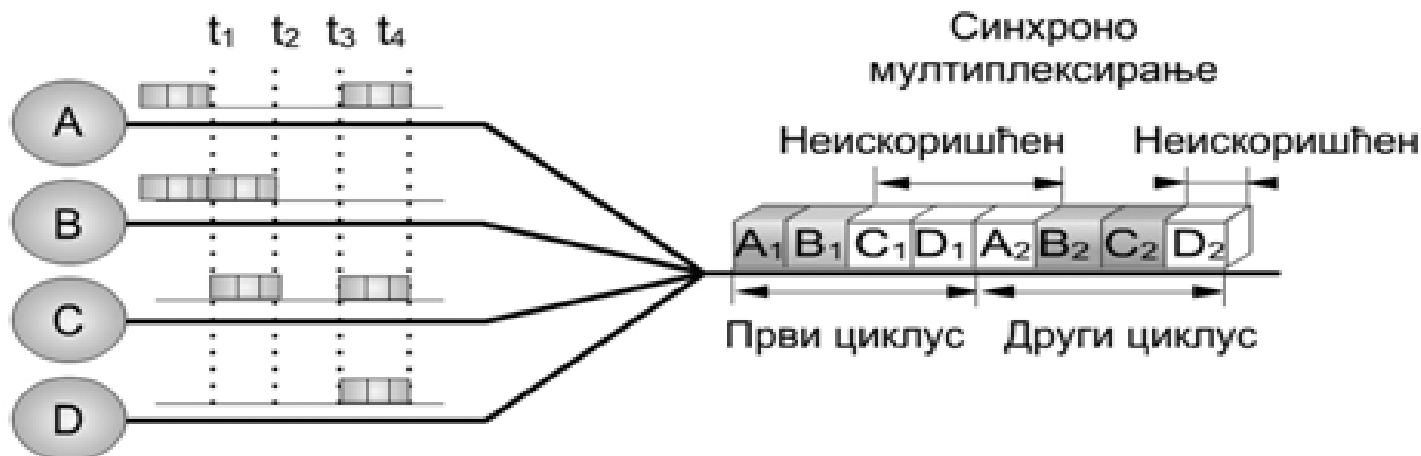
# Statističko multipleksiranje

- Paketska komutacija ***ne obezbeđuje iluziju namenskog linka*** za bilo koji par hostova koji komuniciraju, ali
  - I. Ne troši kapacitet*** bilo kog linka zato što je svaki komutator u stanju da ***šalje bilo koji paket kome je link potreban*** (sledeći slajd)
  - II. Ne zahteva faze*** uspostave i raskidanje veze, ali, omogućuje ***prenos sa „overhead“-a***
  - III. Može da omogući različite protoke*** podataka za različite sesije komunikacije u suštini „na zahtev“



# Statističko multipleksiranje

Statističko multipleksiranje - Efikasno korišćenje komunikacionog linka



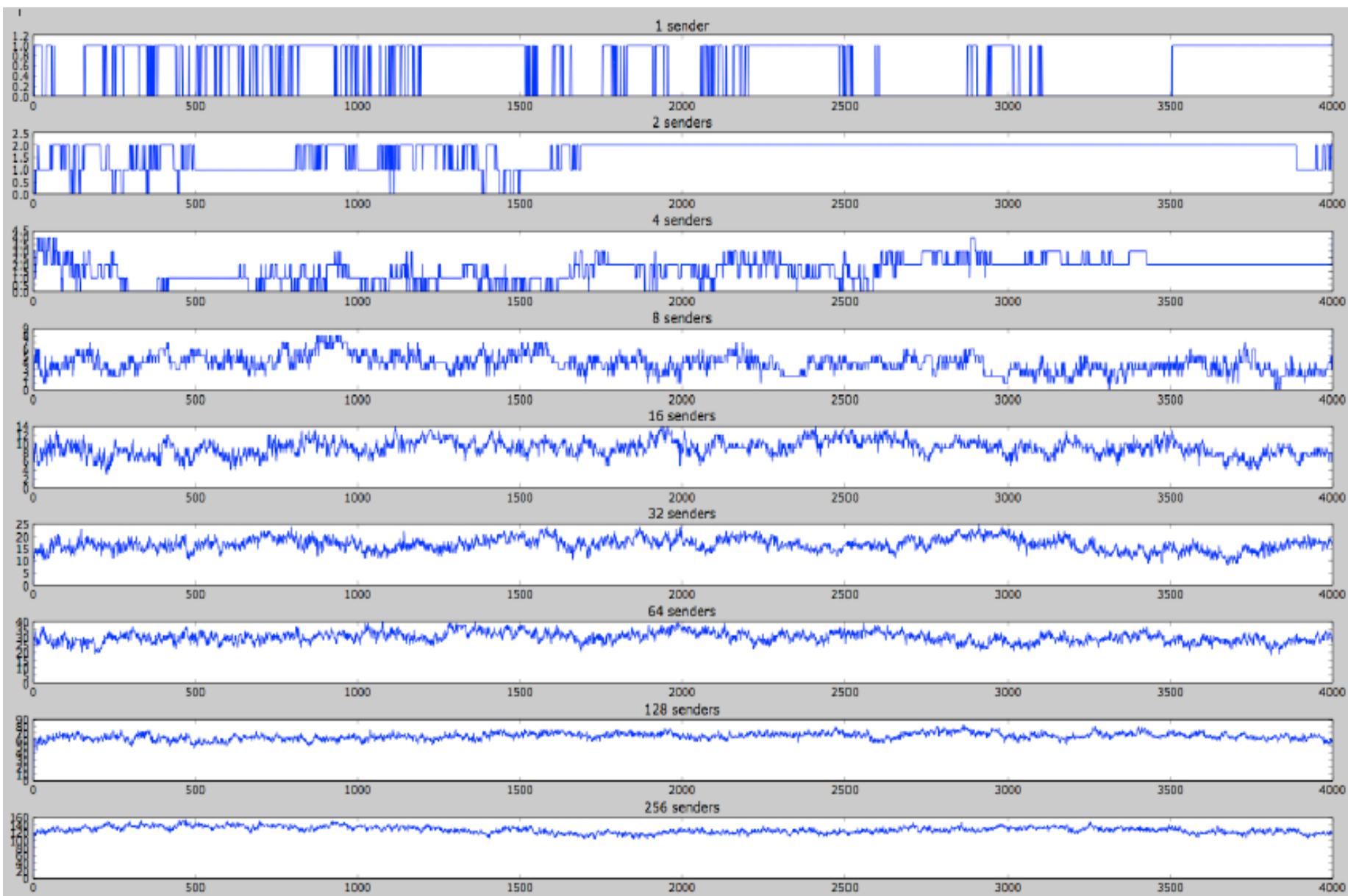


# Statističko multipleksiranje

- *Ne predviđa nikakvo predhodno zauzimanje resursa* - *paketi mogu nailaziti brže nego što oni mogu biti poslani* na odlazni link
- Komutator mora biti u stanju da odgovori na ovakve situacije

# Statističko multipleksiranje

- Omoгуćuje krajnjim tačkama da **šalju podatke promenljivim intezitetom**
- Sinhronizacijom takvih izvora (sinhronizovano slanje – koriste link istovremeno) – **potrebno je obezbediti link** koji je u mogućnosti da **upravlja vršnim intezitetom** kako bi se obezbedila potrebna usluga za sve istovremene konekcije
- Ovakva sinhronizacija je malo verovatna
- Čak i u slučaju on-off izvora saobraćaja – **zbirni saobraćaj više izvora teži ujednačavanju**



Izvor: on-off, 1Mb/s u on stanju



# Paketska komutacija

- Postoje **dve tehnike prenosa** bazirane na komutaciji paketa:
  - **datagramski** pristup
  - “**virtuelni kanal**” pristup



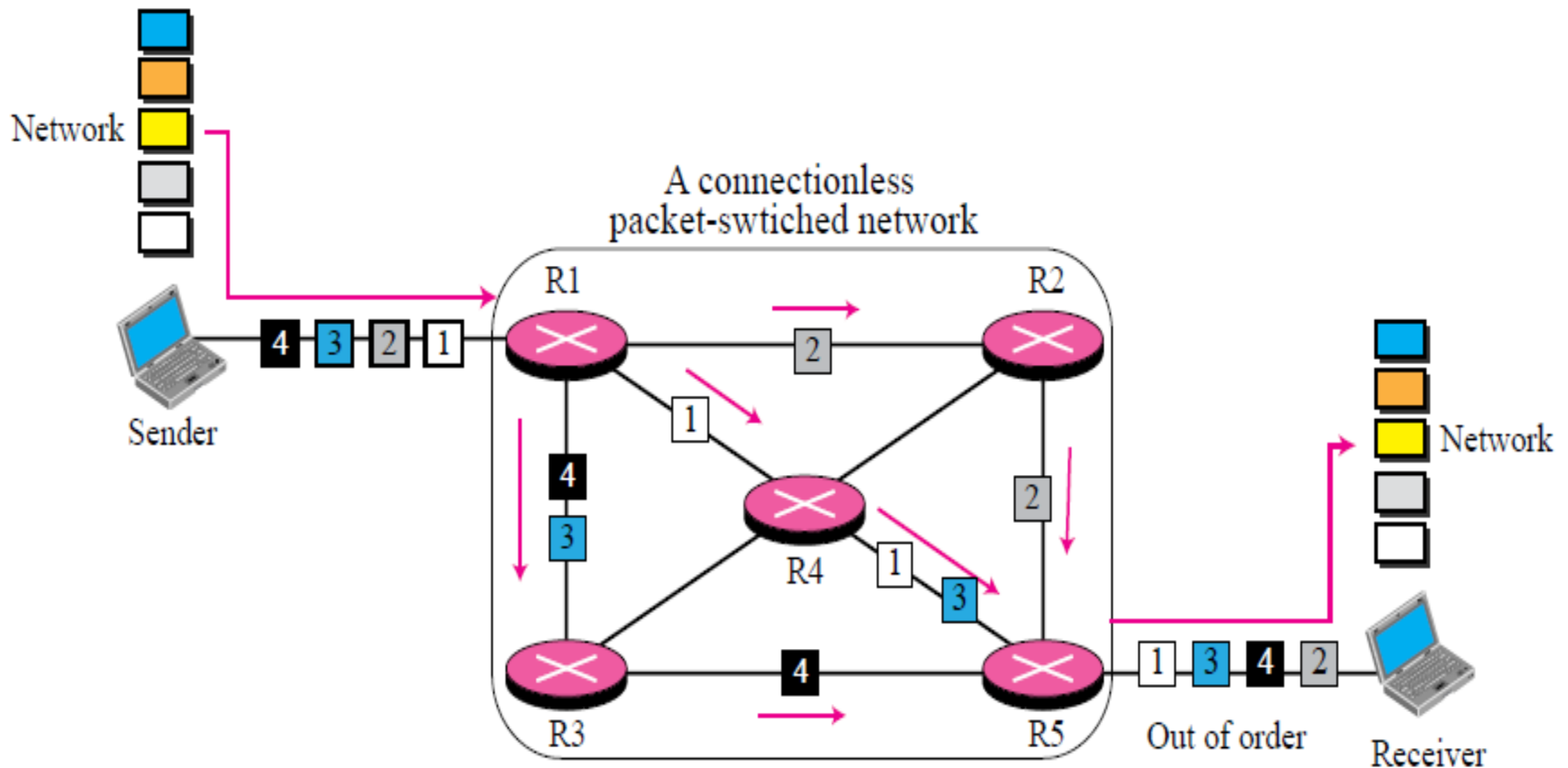
# Paketska komutacija

Komutacija paketa – ***datagramski*** pristup

- Kod mreža sa komutacijom paketa (***datagramski*** pristup), svaki paket se u svakom ruteru nezavisno obrađuje
- Način na koji će ruter postupiti prema datom paketu ne zavisi od toga kako je postupao prema prethodnim paketima

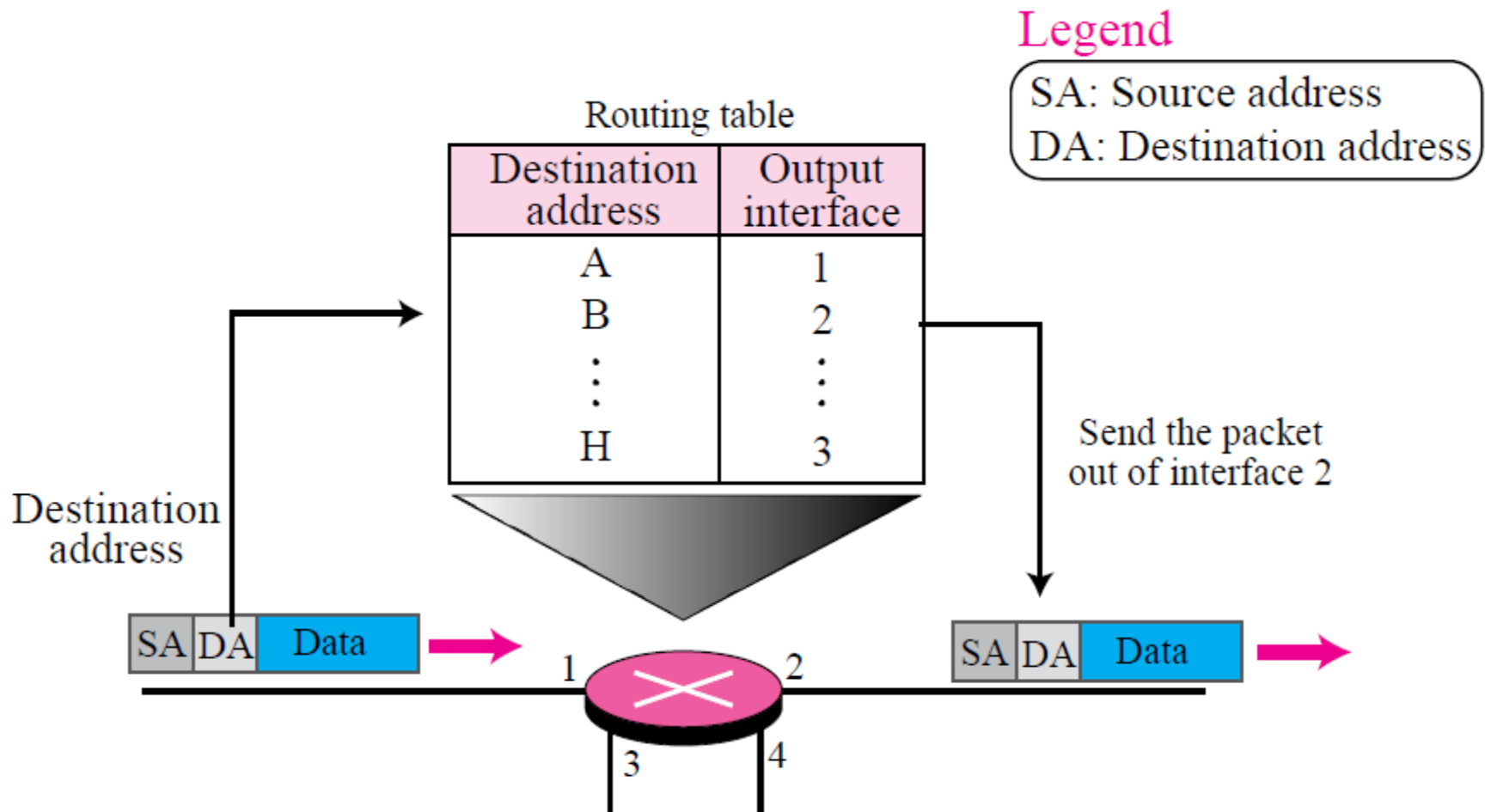
# Paketska komutacija

## Komutacija paketa – datagramski pristup



# Paketska komutacija

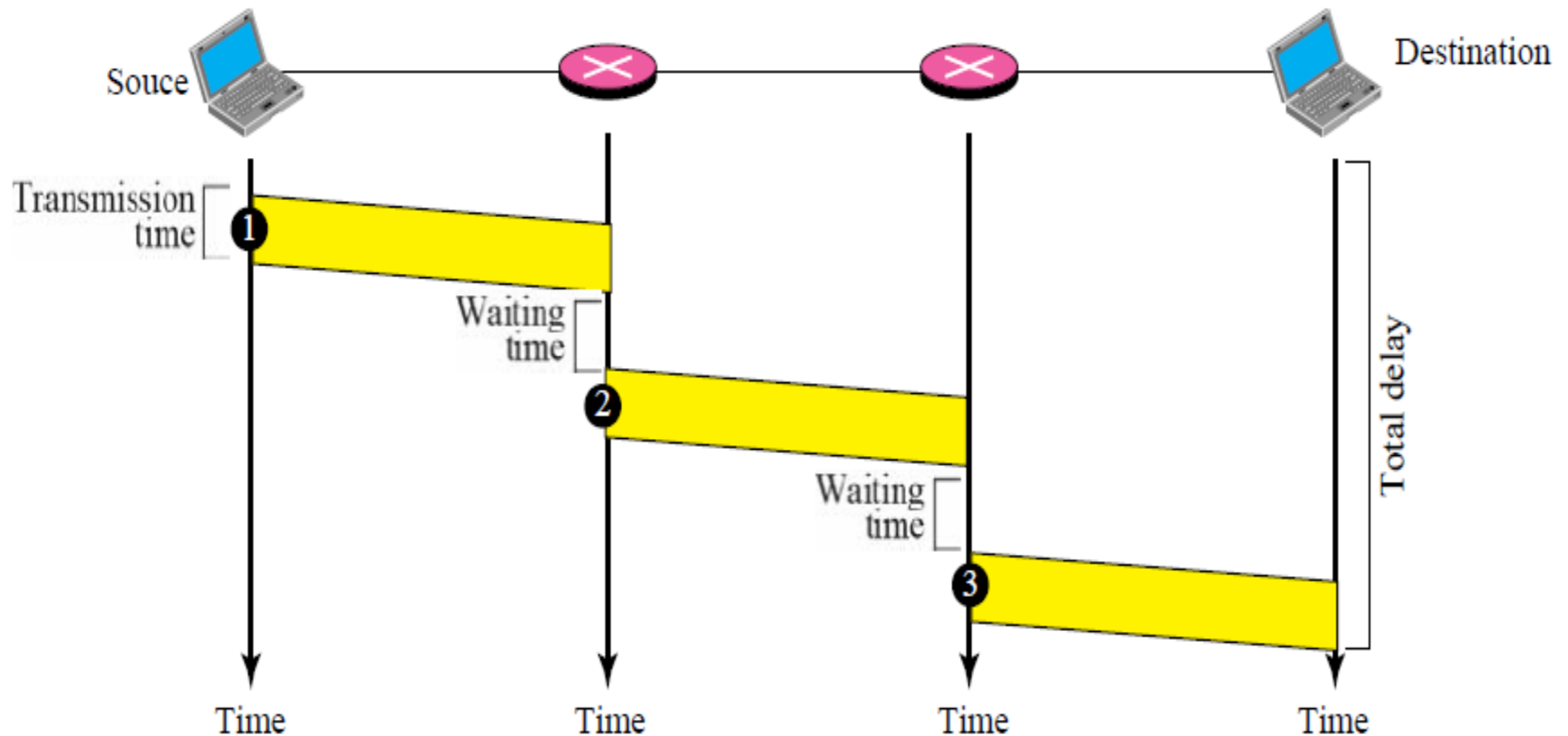
## Komutacija paketa – datagramski pristup





# Paketska komutacija

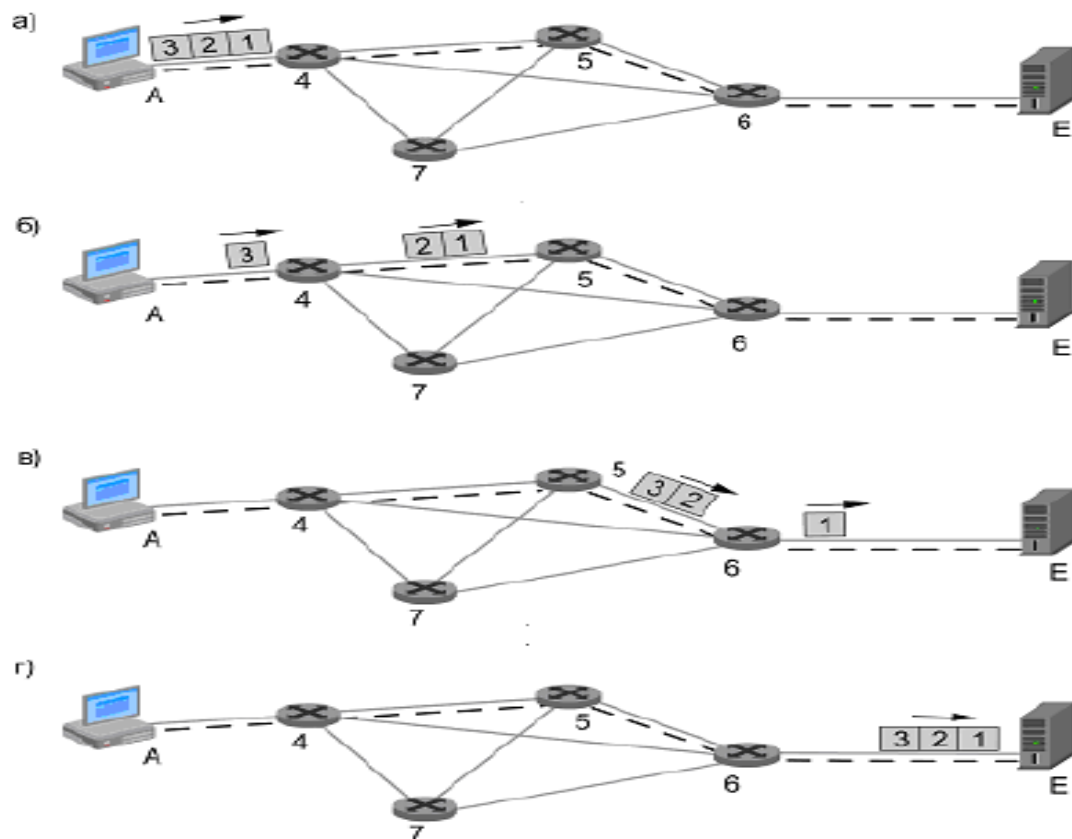
## Kašnjenje kod datagramskog pristupa



# Mrežne konfiguracije

## Komutacija paketa – “virtuelni kanal” pristup

Pre nego što se svi datagrami poruke mogu slati, **neophodno je kreirati virtuelnu konekciju** kojom se **definiše put datagrama** od izvorišta do odredišta





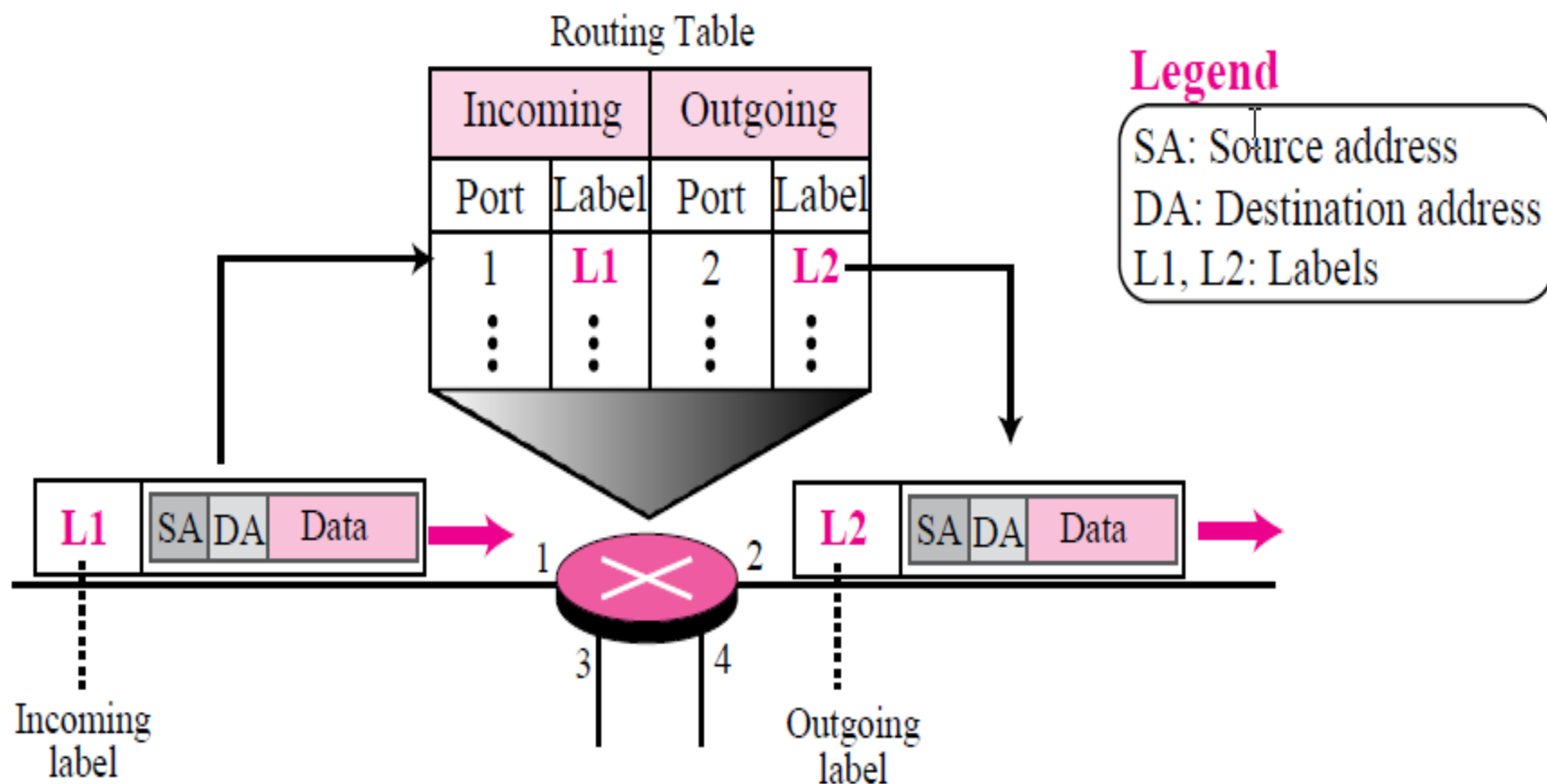
# Paketska komutacija

## Komutacija paketa – “**virtuelni kanal**” pristup

- Nakon što je konekcija uspostavljena, datagrami putuju po istom putu
- Kod ovog tipa prenosa, paket ne sadrži samo informaciju o izvorišnoj i odredišnoj adresi nego i identifikator virtuelnog kanala (*flow label*, tj., *virtual circuit identifier*) kojim se definiše virtuelni put paketa

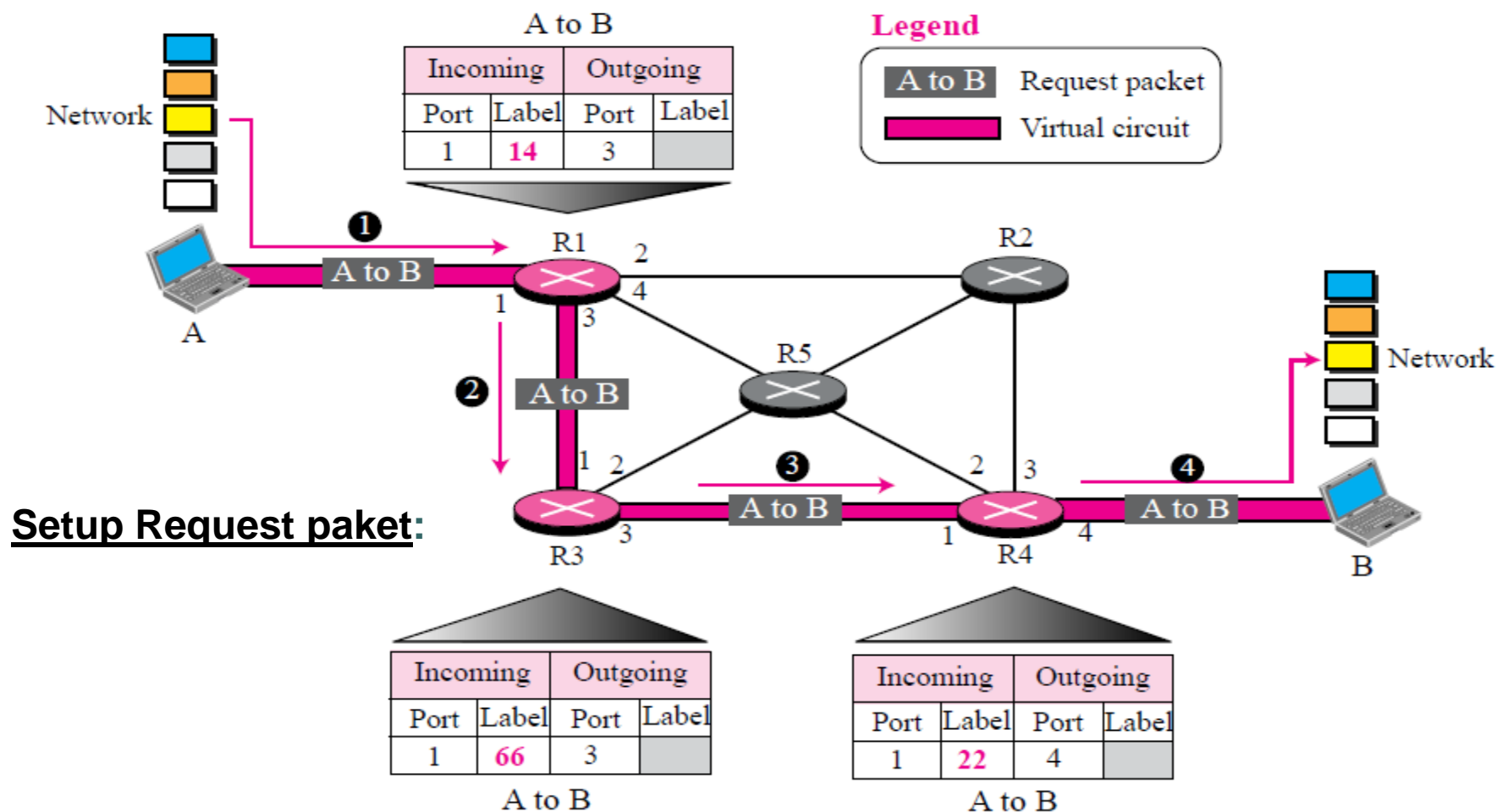
# Paketska komutacija

Komutacija paketa – “**virtuelni kanal**” pristup



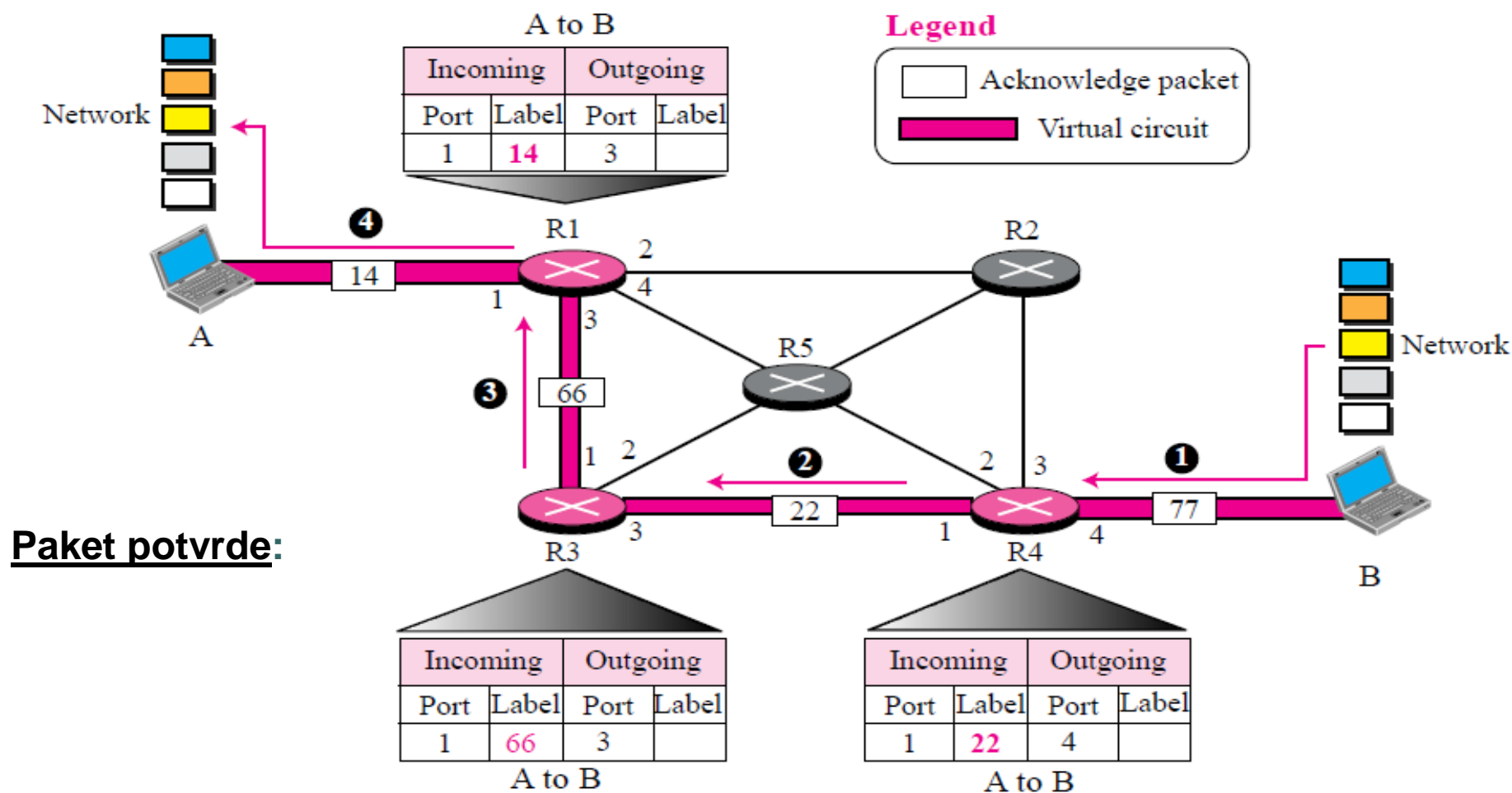
# Paketska komutacija

“virtuelni kanal” pristup – faza uspostave veze



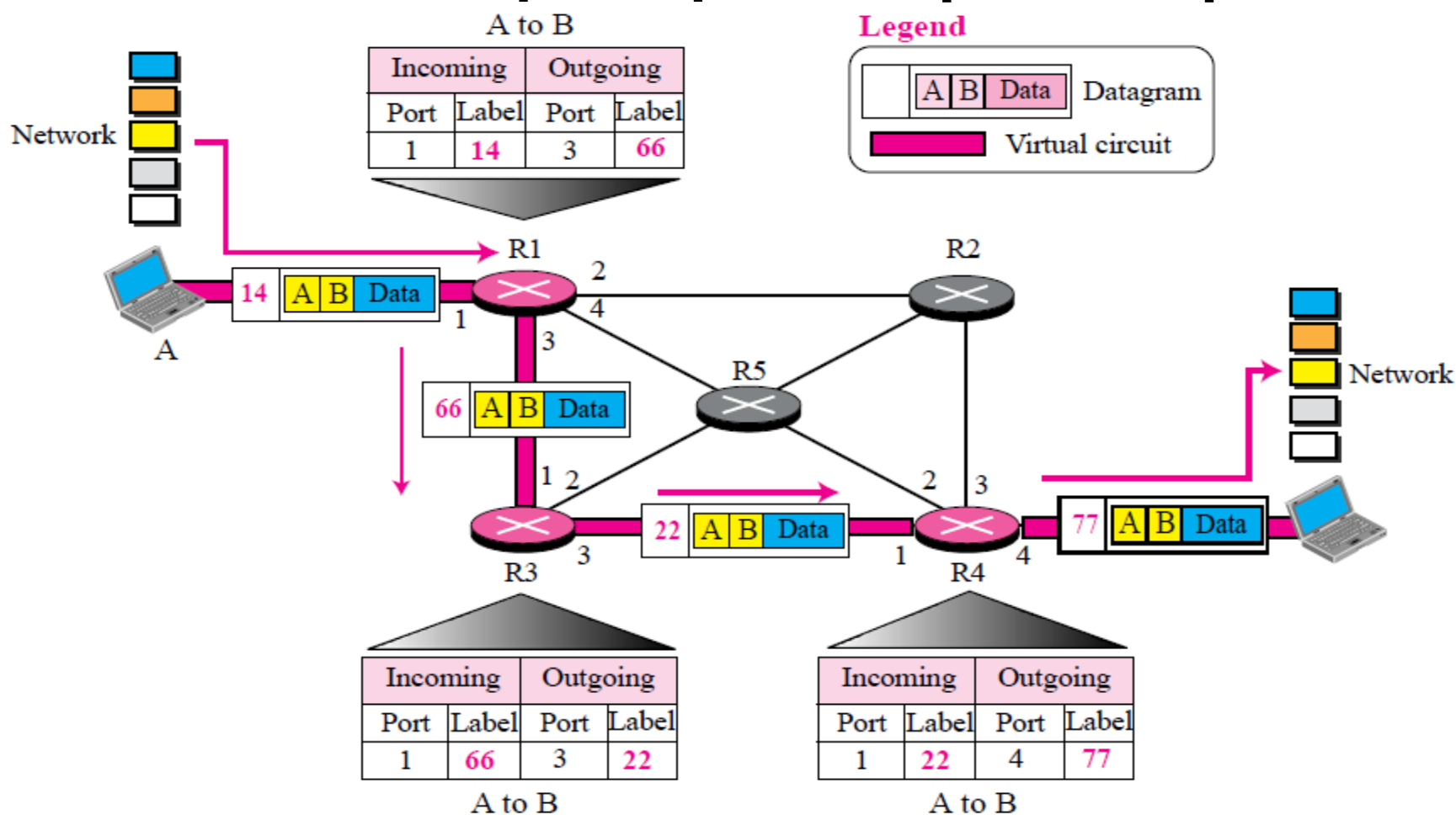
# Paketska komutacija

“virtuelni kanal” pristup – **faza uspostave veze**



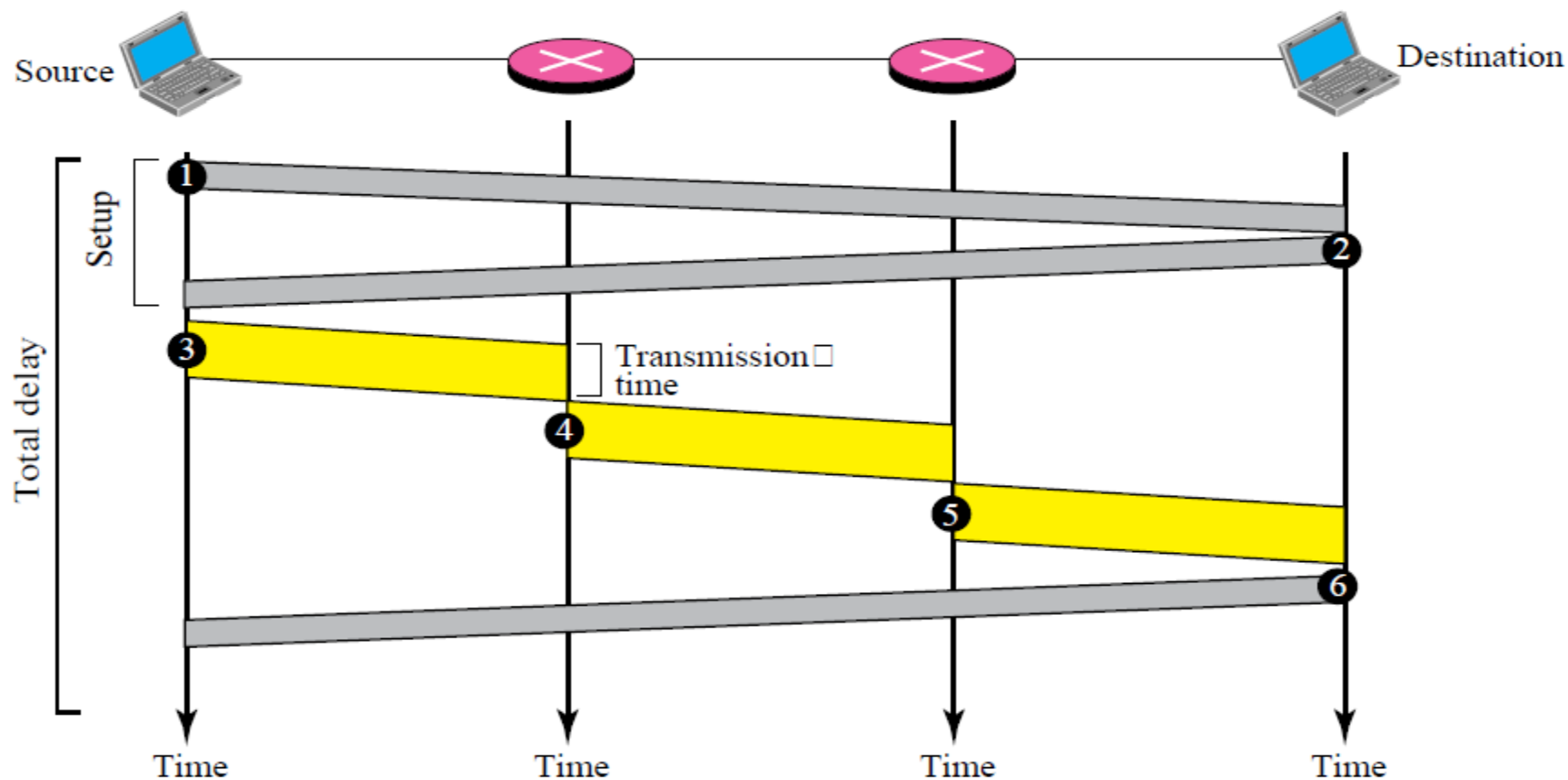
# Paketska komutacija

“virtuelni kanal” pristup – faza prenosa podataka



# Paketska komutacija

## Kašnjenje kod “virtuelni kanal” pristupa







# Paketska komutacija

## Karakteristike paketskog prenosa

- Princip komutacije paketa omogućava **uvodenje prioriteta**
- **Ruter**, umesto da se prilikom slanja paketa na izlaznu liniju drži striktnog redosleda paketa u redu čekanja, **može dati prednost paketima sa visokim prioritetom**
- Paket visokog prioriteta biće izabran za slanje **bez obzira na njegovu poziciju** u redu čekanja
- Na taj način, paketi višeg prioriteta prenosiće se brže kroz mrežu nego paketi niskog prioriteta

# Paketska komutacija

## Karakteristike paketskog prenosa - *nedostaci*

- ***Kašnjenje u prenosu*** je jednako količniku dužine paketa i brzine prenosa preko dolazne linije - vreme koje je potrebno da se paket u celosti pošalje iz jednog čvora ka drugom čvoru

$$\text{kašnjenje} = \text{dužine paketa} / \text{brzine prenosa}$$

# Paketska komutacija

## Karakteristike paketskog prenosa - *nedostaci*

- Prolazak paketa kroz ruter unosi dodatno *kašnjenje* u prenosu
- Na kašnjenje u prenosu *treba dodati vreme*
  1. Procesiranja (obrade) paketa i
  2. Vreme čekanja paketa u redu čekanja, koje je promenljivo i uslovljeno trenutnim uslovima u mreži
- I još....
  1. *Kašnjenje* usled *prostiranja* signala



# Paketska komutacija

## Karakteristike paketskog prenosa - *nedostaci*

- Generalno: ukupno **vreme kašnjenja paketa** jednako je **zbiru kašnjenja paketa kroz svaki ruter** na putanji koju paket prolazi + prostiranje

# Paketska komutacija

## Karakteristike paketskog prenosa – *nedostaci*

- Paketi:
  - Mogu se *razlikovati po dužini*,
  - Mogu se prenositi *različitim putanjama* i
  - Mogu biti izloženi *promenljivim kašnjenjima u ruterima*
- Uslovljavajući da –
- **Sveukupno vreme prenosa** paketa od datog para izvor-odredište, može značajno da **varira od paketa do paketa**



# Paketska komutacija

## Karakteristike paketskog prenosa – *nedostaci*

- Ova **pojava** se naziva **treperenje** ili **džiter** (*jitter*) i **može biti nepoželjna** kod izvesnih aplikacija, kao što su aplikacije koje zahtevaju prenos podataka u relanom vremenu (telefonija, video, audio, ..)

# Paketska komutacija

## Karakteristike paketskog prenosa - *nedostaci*

- *Problem overhead-a*
- **overhead** = zaglavlje / (zaglavlje + payload)
- Da bi se **omogućilo usmeravanje paketa** kroz mrežu, svaki paket osim podataka mora sadržati i **dodatne kontrolne informacije** (npr. adresa odredišta, redni broj paketa u poruci i sl.)
- Za prenos kontrolnih informacija troši se **deo komunikacionog kapaciteta prenosnih linija**, čime se smanjuje raspoloživ kapacitet za prenos korisničkih podataka (payload)

# Paketska komutacija

## Karakteristike paketskog prenosa - *nedostaci*

### *Primer:*

- Šaljemo e-mail poruku veličine **10KB**, gde su **paketi** koji se šalju maksimalne **veličine 1024 bita** (**128 bita** zauzima **zaglavlje**) - što ostavlja **896 bita** za korisnički podaci - **payload** (1024-128)
- Pretvorimo 10KB u bitove  $10 * 1024 * 8 = \mathbf{81920}$  **bitova**
- Kada podelimo celobrojno 81920 na 896 dobijamo  $81920 / 896 = 91 + 384$  bita ostatka





# Paketska komutacija

## Karakteristike paketskog prenosa - *nedostaci*

### Primer:

To znači da će:

- email poruka veličine 10KB biti podeljena u 92 paketa
- komutacijom paketa za 10KB tj. 81920 bitova bit neophodno poslati 93696 bita,
- Što ***je više od 11% od veličine originalne poruke!***

# Paketska komutacija

- Dinamika saobraćaja
- Slika koja sledi prikazuje **zbirnu količinu podataka** (u bajtovima) koja se prenosi kroz mrežu - ***kao funkcija vremena***
- Saobraćaj se meri u periodima različitog trajanja
  - Prvi grafikon - 10ms
  - Drugi grafikon – 100ms
  - Treći grafikon – 1s

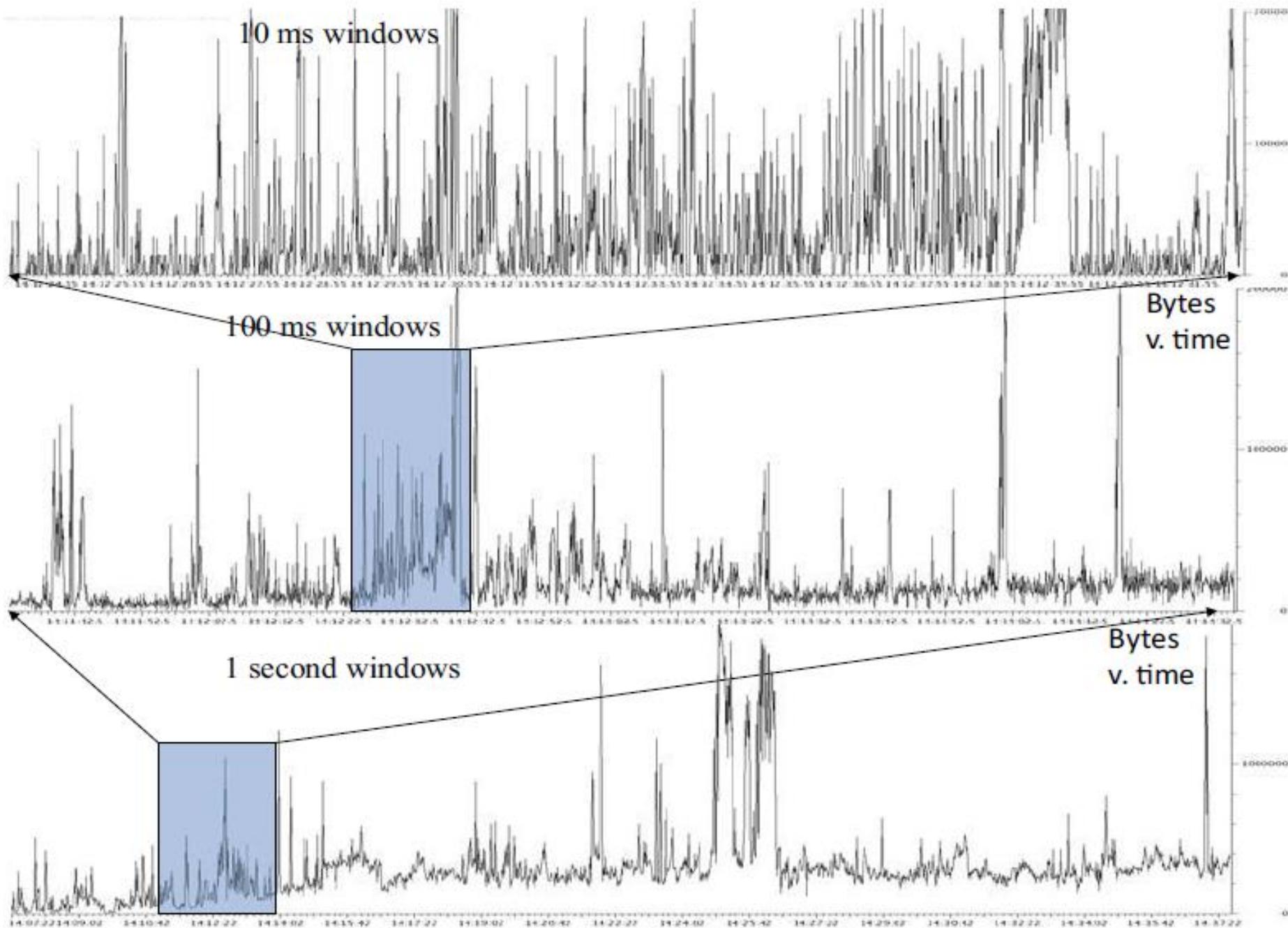
10 ms windows

100 ms windows

1 second windows

Bytes  
v. time

Bytes  
v. time



# Paketska komutacija

## ○ Dinamika saobraćaja

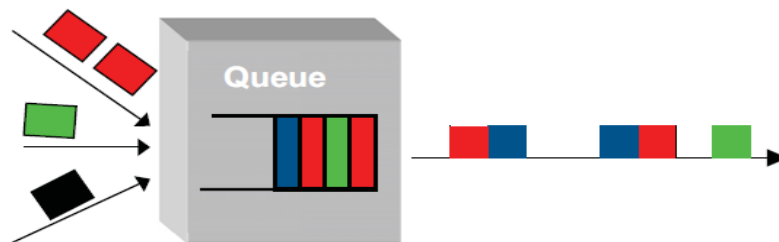
- I. Evidentno **postojanje velike varijabilnosti** u intervalima posmatranja – **posledica grupnih nailazaka (sporadičnog saobraćaja)**
  - Maksimalna količina podataka u jednom intervalu je 50.000 bajtova, ali postoje uzastopni intervali u kojima količina podataka je između 20.000 i 0 bajtova
- II. Varijabilnost je i dalje očigledna ali je **varijansa je redukovana**
- III. Ista manifestacija i dalje traje, iako **varijabilnost ne nestaje**

# Paketska komutacija

- Dinamika saobraćaja
- Ovi podaci nedvosmisleno ***ukazuju na dinamiku saobraćaja*** koju planeri mreže moraju ***uzeti u obzir prilikom projektovanja mreže***
- Kako projektovati ***kapacitet odlaznog linka?***
  - mora biti **veći od maksimuma** koji se očekuje u kratkim vremenskim intervalima
  - ili
  - **znatno manji** ali uz korišćenje redova čekanja koji bi ***apsorbovali pikove grupnih nailazaka***

# Apsorpcija grupnih nailaska

- **Redovi čekanja** (*baferi*) su ključna komponenta svake mreže sa paketskom komutacijom
- Oni u komutatorima **apsorbuju grupne nailaske podataka**



- Kada **paketi nailaze** na odlaznom linku **brže nego što je kapacitet** tog linka - red čekanja za taj link memoriše te pakete
- Ako paket nailazi u trenutku punog reda čekanja – tada se paket jednostavno odbacuje



# Apsorpcija grupnih nailaska

***Može se doći u iskušenje!***

- Redovima čekanja ***dodeliti veliku količinu memorijskog prostora***
- Time bi se ***izbegao gubitak paketa*** (što je očigledno loša stvar)
- Ako je ***malo memorije*** - veliki broj paketa će biti odbačeno
- Ako je ***previše memorije*** - kašnjenje paketa može biti jako veliko

***Kako odrediti dužinu reda čekanja?***

# ● ● ● | Apsorpcija grupnih nailaska

## *Kako odrediti dužinu reda čekanja?*

- Odgovor *nije lak*
- *Jedan način* - znati *maksimalno dozvoljeno kašnjenje* paketa, i na osnovu tog podatka odrediti dužinu reda čekanja
- Redovi čekanja
  - mogu sprečiti gubitak paketa, ali
  - prouzrokuju kašnjenje u prenosu
- Kašnjenje je, dakle, „nužno zlo“





# Apsorpcija grupnih nailaska

Pored toga,

- ***Kašnjenja su promenljiva***
- Generalno, vremena čekanja svakog paketa u redu čekanja su različita
- Kao rezultat, ***analiziranje performansi mreže nije jednostavan posao***

# Mere performansi mreže

- Procena: ***“Da li mreža funkcioniše dobro ili ne?”***
- Da bi uradili taj posao - ***potrebno je definisati neke veličine*** koje ste u stanju da izmerite – pa ***na osnovu njih*** da procenjujemo performanse mreže
- ***Kao korisnik***, ako želite da isporučite ili preuzmete neke podatke kroz mrežu, ***prirodna mera*** koju možete koristiti je ***brzina kojom je to moguće uraditi*** - ***vreme koje je potrebno da se taj prenos (isporuka) izvrši***

# Mere performansi mreže

- **Podaci** koje treba isporučiti ***su dužine S bajtova***
- Potrebno je ***T sekundi za isporuku*** tih podataka
- **Protok ili propusnost** (*throughput*) prenosa
- Može biti zadat kao:
  - ***Intezitet prenosa*** podataka - ***S/T bajtova/sekundi***
  - Kao ***vreme prolaska jedinice podataka*** (*throughput time*) kroz sistem
- Što je protok veći, to je zadovoljstvo sa radom mreže veće, i obrnuto

# Mere performansi mreže

- **Protok** prenosa je ograničen odozgo **bitskom brzinom najsporijeg linka** na putanji između predajnika i prijemnika
- **Protokoli** pokušavaju da optimizuju protok prenosa velike količine podataka
- Optimizacija se, uglavnom, bazira na dva faktora:
  - I. **kašnjenje** na nivou paketa, i
  - II. intezitet **gubitaka** paketa



# Mere performansi mreže

## Intezitet gubitaka paketa (*packet loss rate*)

- **Procenat paketa** koje je mreža trebala da prosledi do krajnjeg odredišta – ali nije!  
ili,
- **Broj odbačenih paketa** u mreži duž njegove putanje **od predajnika do prijemnika** **podeljen sa ukupnim brojem poslatih paketa**

# Mere performansi mreže

## Intezitet gubitaka paketa

### ○ *Tumačenje:*

**(1)** preko *količine prenetih podataka (broja prenetih paketa)*

- Predajnik šalje  $S_t$  paketa a prijemnik dobija  $S_r$  paketa
- Intezitet gubitaka paketa =  $1 - S_r/S_t = (S_t - S_r)/S_t$
- Kao verovatnoća ili u procentima

# Mere performansi mreže

## Intezitet gubitaka paketa

(2) preko ***predajnog i prijemnog inteziteta***  
(***ekvivalentno tumačenje***)

- ***Intezitet nailaska paketa*** u predajni bafer na predajnoj strani – ***A paketa/sek***
- ***Intezitet odlazaka paketa*** iz prijemnog bafera na prijemnoj strani – ***D paketa/sek.***
- Intezitet gubitaka paketa = ***1 – D/A***



# Mere performansi mreže

## Kašnjenje u prenosu paketa

- Kašnjenje u prenosu paketa po putanji jednako je ***zbiru kašnjenja prouzrokovanih iz četiri izvora:***
  - 1) ***prostiranje*** (*propagation*),
  - 2) ***prenosa*** (*transmission*),
  - 3) ***obrade*** (*processing*) i
  - 4) ***čekanja u baferu*** (redu čekanja, *queueing*)



# Mere performansi mreže

Kašnjenje u prenosu paketa – usled prostiranja

- ***Brzina prostiranja signala kroz prenosni medijum je limitirana***
- **Radio komunikacije – najbrže prostiranje - brzina svetlosti kroz vakum (vazduh), oko  $3 \times 10^8$  metara/sek**
- **Žičani - Uglavnom 2/3 brzine prostiranja svetlosti kroz vakum**



# Mere performansi mreže

## Kašnjenje u prenosu paketa – usled prostiranja

- Vreme kašnjenja usled prostiranja praktično je jednako je vremenu koje je **potrebno da prvi bit prenosa dostigne željeno odredište**
- ***Za putanju*** koja se sastoji ***od više redno organizovanih linkova i komutatora***
- Kašnjenje usled prostiranja na putanji jednak je **zbiru kašnjenja na pojedinačnim linkovima**

# Mere performansi mreže

## Kašnjenje u prenosu paketa – usled obrade

- Ulaskom paketa u komutator - ***potrebno ga je obraditi pre slanja*** ka odredišnom linku
- U mrežama sa paketskom komutacijom, ta ***obrada***, u najmanju ruku, ***uključuje***
  - ***pretragu odgovarajuće tabele*** kako bi se odredio odlazni link
  - obrada može zahtevati i ***modifikaciju zaglavlja paketa***

# Mere performansi mreže

## Kašnjenje u prenosu paketa – usled prenosa

- **Vreme** potrebno **da paket dužine  $S$  bitova bude poslat (u celosti)** preko datog linka
- **Bitska brzina** linka  **$R$  b/s** (bitski interval  $1/R$  sek.),
- Kašnjenje usled prenosa =  **$S/R$  sekundi**
- Napomenimo da kašnjenje usled prenosa **zavisi od tehnologije izrade komutatora**

# Mere performansi mreže

## Kašnjenje u prenosu paketa – usled prenosa

- **Store-and-forward** komutatori
  - **Povećava** kašnjenje
  - Svaki paket se primi (memoriše) u celosti pre obrade
- **Cut-through** komutatori
  - Sa **ekstremno malim kašnjenjem** usled prenosa
  - Obrada paketa počinje **prijemom destinacionih informacija iz zaglavlja** a paket se šalje ka odlaznom linku bez predhodnog memorisanja



# Mere performansi mreže

## Kašnjenje u prenosu paketa – usled prenosa

- ***Cut-through*** komutatori
- Komutator kao da spoji pokretnom trakom prenosom paketa po jednom linku sa prijemom na drugi link
- Obrada u jednom komutatoru je na isti način spojena sa prijemom na odlaznom linku, tako da
- ***Kašnjenje*** paketa ***s kraja na kraj je manje*** od ***prostog zbira*** individualnih izvora kašnjenja

# Mere performansi mreže

## Kašnjenje u prenosu paketa – usled baferovanja

- **Baferi** (redovi čekanja) su **fundamentalne strukture podataka** u mrežama sa paketskom komutacijom
- Cilj im je da **apsorbuju grupne nailaske** paketa na odlazni link
  - **Brzina nailaska** paketa, u tom intervalu, **je veća od** prenosnog **kapaciteta** tog linka
- Vreme koje paket provede u baferu naziva se - **kašnjenje usled čekanja u baferu**

# Mere performansi mreže

## Kašnjenje u prenosu paketa – usled baferovanja

- Za razliku od drugih komponenti
- ***Kašnjenje usled čekanja u baferu*** je često ***promenljivo***
- ***Može biti dominantan izvor kašnjenja***, sa učestvovanjem od oko 50% u ukupnom kašnjenju paketa ***u slučaju nagomilavanja u mreži***
  - U nekim mrežama, kao što su one sa ***satelitskim*** linkovima, kašnjenje usled prostiranja može biti dominantan izvor ukupnog kašnjenja



# Little-ova formula

- *Odnos između* prosečnih vrednosti
- $\bar{N}$  – prosečan broj paketa u sistemu
- $\bar{D}$  – prosečno kašnjenje u sistemu
- $\lambda$  – prosečan intezitet nailaska paketa u sistem
- *Little-ova formula:*

$$\bar{N} = \lambda \times \bar{D}$$

# Little-ova formula

- **Formula** je vrlo **očigledna**, to pokazuje sledeći **neformalni dokaz**:
- Pretpostavimo da poslati **paketi u proseku provedu u sistemu  $\bar{D}$**  sekundi
- Novi **paketi nailaze intezitetom** u proseku  $\lambda$  paketa u sekundi
- **Odlazeći paket iz sistema**, u sistemu **ostavlja prosečan broj paketa  $\bar{N}$**

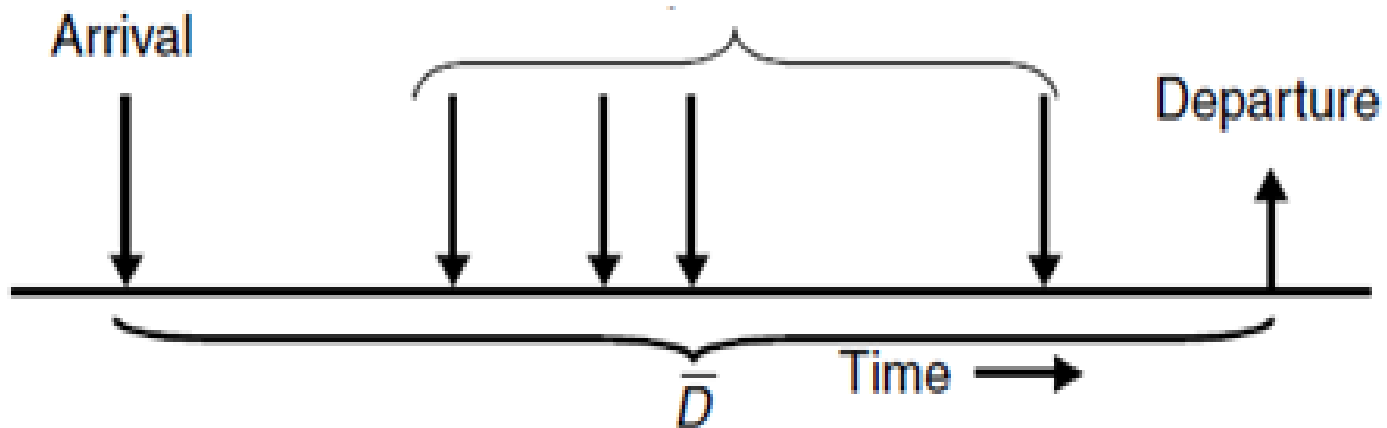
# Little-ova formula

 $\bar{N}$  $=$  $\lambda$  $\times$  $\bar{D}$ 

prosečan broj u sistemu

prosečan intezitet nailaska

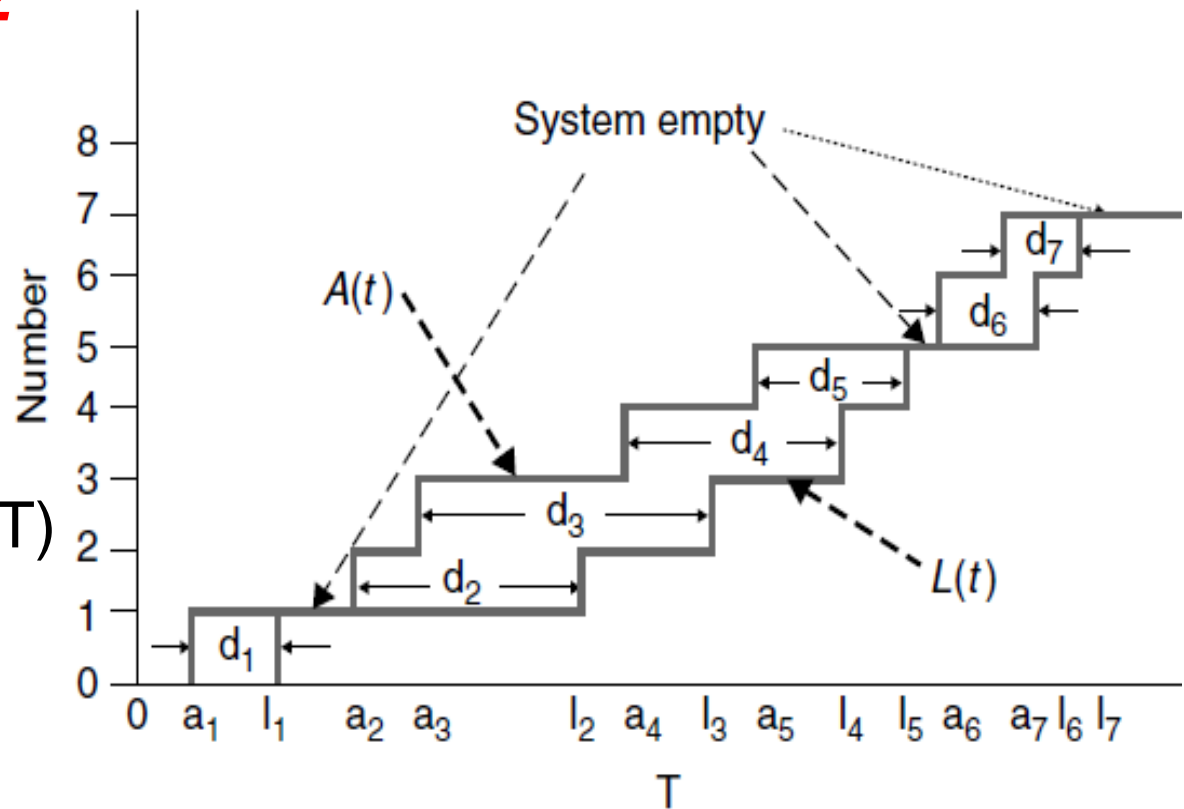
prosečno kašnjenje



# Little-ova formula

## Grafički dokaz

Na slici su prikazani  
***nailasci paketa*** i  
***odlasci paketa*** iz  
inicijalno praznog  
sistema u intervalu  $(0, T)$   
Predpostavimo  
***FCFS disciplinu***



# Little-ova formula

$A(t)$  označava kumulativni proces broja nailaska paketa do trenutka  $t$ . Svakim nailaskom  $A(t)$  se inkrementira za 1.  $A(T)$  označava ukupan broj nailazaka u intervalu  $(0, T)$ .

Grafikon funkcije  $L(t)$  označava broj paketa koji su napustili sistem do trenutka  $t$ .

Funkcija  $N(t) = A(t) - L(t)$  predstavlja broj paketa u sistemu u trenutku  $t$ .

Usled FCFS discipline, vremenski intervali  $d_i$  predstavljaju vreme boravka  $i$ -tog paketa u sistemu.

Neka je  $\Delta(T)$  površina između grafikona  $A(t)$  i  $L(t)$ .

$$\Delta(T) = d_1 + d_2 + \dots + d_n$$



# Little-ova formula

Prosečan broj paketa na intervalu  $(0, T)$  u sistemu je po definiciji

$$\bar{N}(T) = \frac{1}{T} \int_0^T N(t) dt$$

Ako sada iskoristimo vrednost  $\Delta(T)$ , dobijamo

$$\bar{N}(T) = \frac{\Delta(T)}{T}$$

Dalje, srednje vreme kašnjenja u sistemu možemo izraziti preko  $\Delta(T)$

$$\bar{D}(T) = \frac{\Delta(T)}{A(T)}$$

# Little-ova formula

Definišimo  $\lambda(T)$  kao prosečan intezitet nailaska paketa u intervalu  $(0, T)$ , sledi

$$\lambda(T) = \frac{A(T)}{T}$$

Ako povežemo sve ove formule,

$$\bar{N}(T) = \frac{\Delta(T) A(T)}{A(T) T} = \lambda(T) \bar{D}(T)$$

Sada, pustimo da  $T \rightarrow \infty$ , ako sledeće granične vrednosti postoje,



# Little-ova formula

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \lambda(T) = \lambda,$$

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \bar{D}(T) = \bar{D}$$

Tada postoji i granična vrednost,

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \bar{N}(T) = \bar{N} = \lambda \cdot \bar{D}$$